

بررسی خواص اپتیکی نانوساختارهای مکعبی شکل طلا- گرافن به کمک تقریب دوقطبی‌های مجزا

عباس آذریان

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه قم، قم

(دریافت مقاله: ۹۶/۰۷/۱۸- پذیرش مقاله: ۹۷/۰۸/۲۳)

چکیده

در این مقاله خواص نوری نانو مکعب‌های طلا که تعداد لایه‌های متفاوتی از گرافن روی یک یا دو وجه آن لایه نشانی شده، مورد بررسی قرار گرفته و بازده خاموشی (مجموع جذب و پراکندگی) با استفاده از روش تقریب دوقطبی مجزا (DDA) در محدوده میدان دور و نزدیک محاسبه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش تعداد لایه‌های گرافن از ارتفاع قله خاموشی به میزان قابل توجهی کاسته می‌شود. ضمن آن‌که با افزایش تعداد لایه‌های گرافن، طول موج قله تشدید پلاسمونی از ۵۱۶ به ۷۰۰ نانومتر انتقال به سرخ می‌یابد (این قله ناشی از دوقطبی شکل گرفته در راستای موازی میدان الکتریکی است) در حالی که طول موج قله دیگر (مربوط به دوقطبی شکل گرفته در راستای عمود بر میدان الکتریکی) در نزدیکی ۲۳۰ نانومتر ثابت می‌ماند. همچنین برای یک ضخامت مشخص گرافن، با افزایش اندازه نانومکعب‌های طلا ارتفاع قله‌ها کاهش یافته و پهنای قله‌ها افزایش می‌یابد ولی با تقریب بسیار خوبی طول موج آن ثابت می‌ماند. نتایج این تحقیق می‌تواند در ساخت آشکارسازهای بیولوژیکی در ناحیه مرئی مورد استفاده قرار گیرد.

Investigation of Optical Properties of Graphene/Au Nanocubes by Discrete Dipole Approximation

Abbas Azarian

Department of Physics, Faculty of Science, University of Qom, Qom, I. R. Iran

(Received 10 October 2017, accepted 14 November 2018)

Abstract

In this article, the optical properties of Graphene/Au nanocubes have been studied for the different number of graphene layers on 1 or 2 faces of cubes. The extinction efficiency factor has been calculated in the near and far-field regime by the discrete dipole approximation (DDA) method. Our results show that the height of extinction's peak decreases significantly, by increases number of graphene layers on nanocube. Moreover, the wavelength of surface plasmon resonance peak redshifts from 516 to 700 nm (this peak is due to dipole formed along the polarisation direction), although the wavelength of the another peak stays constant about 230 nm (this peak is due to dipole formed perpendicular to the polarisation). In addition, with increasing size of nanocubes, the height of peaks decrease, the width of them increase and wavelength of plasmon peaks don't show any shifts for a constant thickness of graphene. The results of this study may be used for fabrication of biological sensors at vis wavelength.

Keywords: Graphene; Au; nanocube; DDA.

E-mail of corresponding author: abas.azarian@gmail.com.

مقدمه

به دلیل سادگی و توانایی حل نانوساختارهای پیچیده و نامنظم بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳ و ۱۴]. این روش بر مبنای برهمکنش میدان الکترومغناطیسی نور فرودی با یک ساختار نانومتری که به صورت آرایه‌ای از دو قطبی‌های نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود، استوار است. در این مقاله خواص اپتیکی نانومکعب‌های طلا در محدوده میدان دور و نزدیک مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این نانومکعب‌ها متشکل از N دوقطبی مجزا در نظر گرفته می‌شود که قطبش پذیری و بردار مکان هر دوقطبی به ترتیب با α_i و Γ_i مشخص می‌شود. وقتی هدف تحت تابش طیف الکترومغناطیس قرار می‌گیرد، ماده هدف قطبی شده و میدان الکتریکی در هر نقطه، ناشی از سهم هر دو میدان الکتریکی فرودی و میدان الکتریکی القایی است. بنابراین قطبش ایجاد شده در هر نقطه به صورت زیر است:

$$P(r_i) = \alpha_i \cdot E_{Loc}(r_i) \quad (1)$$

که میدان الکتریکی موضعی برای موج تخت با طول موج λ به شکل زیر نشان داده می‌شود:

$$E_{Loc}(r_i) = E_0 \exp(ik \cdot r_i) - \sum_{j \neq i} A_{ij} \cdot P_j \quad (2)$$

که E_0 و k به ترتیب بردار موج و دامنه میدان الکتریکی تابشی است. جمله دوم رابطه (2) بیانگر تاثیر میدان الکتریکی ناشی از دوقطبی موجود در مکان j بر دوقطبی موجود در مکان i است که طبق ماتریس زیر محاسبه می‌شود:

$$A_{ij} P_j = \frac{\exp(ikr_{ij})}{r_{ij}^3} \left\{ K^2 r_{ij} \times P_j + \frac{1 - ikr_{ij}}{r_{ij}^2} \times [r_{ij}^2 P_j - 3r_{ij} \cdot P_j] \right\} \quad (3)$$

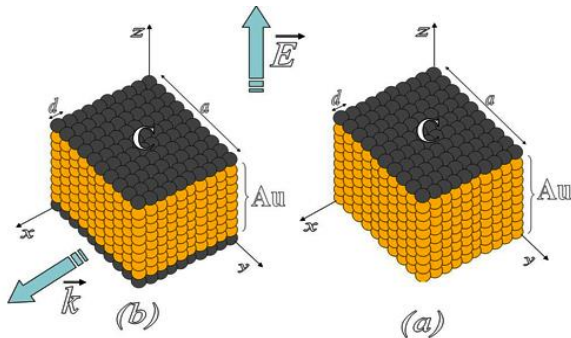
$(j = 1, 2, \dots, N, j \neq i)$

که در آن \vec{r}_{ij} بردار تفاضل مکان دوقطبی‌هاست. بعلاوه A_{ij} ماتریس $N \times N$ بعدی است که اندرکنش بین دو قطبی‌ها را نشان داده و درایه‌های روی قطر اصلی آن معکوس قطبش پذیری را نشان می‌دهند، لذا مساله پراکندگی به سیستمی از معادلات خطی به صورت زیر تقلیل می‌یابد:

$$E_{i,inc} = \sum_{j=1}^N A_{ij} \cdot P_j \quad (4)$$

امروزه مشخص گردیده است که برهمکنش نور با نانوساختارهای فلزی مانند نانوذرات طلا وابسته به اندازه نانوساختارهاست. این امر منجر به توسعه کاربردهای نانوساختارهای فلزی در زمینه‌های فوتونیک، پلاسمونیک، حسگرها و آنتن‌های نانومتری گردیده است [۱-۳]. پلاسمون‌های سطحی نانوذرات فلزی که ناشی از برهمکنش الکترون‌های آزاد با موج الکترومغناطیس است عموماً در ناحیه مرئی قرار داشته و در امتداد فصل مشترک نانوذرات و محیط منتشر می‌گردند [۴]. فرکانس تشدید پلاسمون‌های سطحی تابعی از شکل، اندازه و تابع دی الکتریک محیط در برگیرنده نانوذرات است که با کنترل این پارامترهای می‌توان به خواص دلخواه دست یافت. در سال‌های اخیر ساختارهای ناهمگون طلا بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بعنوان مثال نانوذرات سیلیکا با پوشش نانومتری از طلا خواص فیزیکی و پلاسمونیک قابل کنترلی را بر حسب اندازه هر یک از قسمت‌ها نشان می‌دهد [۵]. بعلاوه محصور کردن یک یا چند لایه از گرافن با نانوذرات طلا، کاربردهای بالقوه جالبی را در حوزه پلاسمونیک بروز می‌دهد [۶ و ۷]. ضخامت، ریخت گرافن‌های چند لایه، نوع زیر لایه و بخصوص نحوه قرارگیری و تعداد نانوذرات طلا، پارامترهای کلیدی در دست یابی به خواص اپتیکی و پلاسمونیک بهینه این ساختارهای ناهمگون هستند [۸ و ۹]. در مقاله حاضر، خواص اپتیکی ساختارهای ناهمگون طلا-گرافن مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که می‌دانیم اولین و مناسب‌ترین گام برای فهم جنبه‌های مختلف خواص اپتیکی نانوساختارهای ناهمگون، شبیه سازی آن‌هاست. روش متعددی بمنظور شبیه سازی رفتار اپتیکی و پلاسمونیک نانوساختارها وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به روش المان محدود (FEM)، روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD)، روش ناپیوسته گالریکین حوزه زمان (DGTD) و تقریب دو قطبی‌های مجزا (DDA) اشاره نمود [۱۰-۱۲]. در این میان روش DDA

که در آن (a) لایه گرافن فقط روی یک وجه از نانومکعب و (b) لایه گرافن روی دو وجه متقابل نانومکعب در نظر گرفته شده، انجام شده است.



شکل ۱. نحوه تابش نور فرودی و پارامترهای بکارگرفته شده در این مقاله

بحث و نتیجه گیری

در شکل (۲) تغییرات بازده خاموشی برای نانو مکعب های طلا-گرافن (با تعداد لایه های متفاوتی از گرافن) بعنوان تابعی از طول موج رسم شده است. طول ضلع تمامی نانو مکعب ها ثابت و برابر ۳۰ نانومتر است. لازم به ذکر است که لایه گرافن تنها بر روی یکی از وجوه مکعب لایه نشانی شده است. چنان که در شکل مشخص است دو مد تشدیدی در طیف خاموشی وجود دارد که به ترتیب مد اول در حوالی ۲۳۰ نانومتر ثابت بوده و مد دوم که در ۵۱۶ نانومتر قرار دارد با افزایش تعداد لایه گرافن به سمت طول موج های بلندتر جابجا می شود. همچنین از ارتفاع نمودارها کاسته شده و پهنای قله ها تقریباً ثابت مانده است.

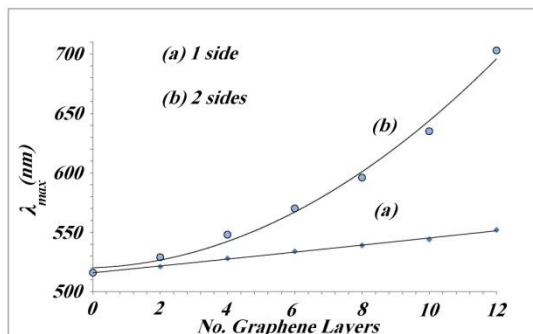
چنان که می دانیم شرط بوجود آمدن تشدید در پلاسمون ها آن است که یک محیط دی الکتریک در مجاورت یک ماده رسانا قرار گیرد تا پلاسمون ها بتوانند در فصل مشترک دو محیط منتشر گردند. از آنجا که شکل نانومکعب به جهت تقارن خود عملاً سبب شکل گیری دو قطبی های الکتریکی در راستای میدان الکتریکی و در جهت عمود بر میدان می گردد، لذا انتظار داریم تا دو مد پلاسمونی برای نانوذرات طلا (n=0) مشاهده گردد که به ترتیب در ۲۳۰ و ۵۱۶ نانومتر به وقوع می پیوندد. با ایجاد لایه گرافن بر روی یکی از سطوح نانومکعب عملاً ثابت دی الکتریک محیط در

از آنجا که دو قطبی ها آرایه ای از N یاخته واحد بوده و شبکه ای دوره ای را تشکیل می دهند، می توان از الگوریتم تبدیل فوریه سریع استفاده کرد. با استفاده از این الگوریتم محاسبات سریع تر شده و تعداد مراحل محاسبات از $O(N^2)$ به $O(N \ln N)$ کاهش می یابد. با حل کردن این معادله برای یک بردار قطبش نامعلوم P_i ، سطح مقطع خاموشی (C_{ext}) بصورت زیر بدست می آید:

$$C_{ext} = \frac{4\pi k}{|E_0|^2} \sum_{i=1}^N \text{Im}(E_{loc,i}^* P_i) \quad (5)$$

برای توضیحات بیشتر پیرامون نحوه عملکرد تقریب دو قطبی مجزا می توان به مرجع [۱۴] مراجعه نمود.

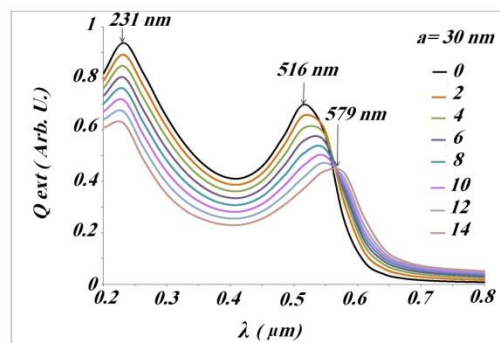
در این مقاله، طول ضلع نانومکعب ها $a = 30 \text{ nm}$ و فاصله میان دو قطبی ها برابر $d = 1 \text{ nm}$ در نظر گرفته شده است. سطح مقطع خاموشی برای نانومکعب طلا در محدوده طول موج ۸۰۰-۲۰۰ نانومتر و برای نور پلاریزه خطی در جهت محور Z محاسبه شده است. ضمن آن که محیط اطراف هوا در نظر گرفته شده است. ثوابت دی الکتریک مربوط به طلا و گرافن به ترتیب از مراجع [۱۵] و [۱۶] استخراج شده و برای شبیه سازی از کد رایگان Ddscat نسخه ۷/۲ استفاده شده است. لازم به ذکر است که خطاهای موجود در تقریب دو قطبی های مجزا بطور کلی شامل دو دسته: ۱- خطاهای ناشی از گسسته سازی شکل توسط یاخته های واحد مکعبی ۲- خطاهای ناشی از همگراسازی جواب هاست که دسته اول را با کوچک تر کردن مقدار d (طول یاخته واحد مکعبی) بگونه ای که $|mkd| < 0.5$ باشد (که m نسبت ضریب شکست جسم به محیط و k عدد موج است) و دسته دوم را با انتخاب مقادیر کوچک تر حد همگرایی (در این مقاله این حد برابر 1×10^{-6} در نظر گرفته شده است) می توان بهبود داد. نتایج سایر گروه ها نشان می دهد که در شرایط فوق حداکثر مقدار خطا کمتر از ۵ درصد خواهد بود [۱۱]. بعلاوه جهت تابش نور فرودی مطابق شکل (۱) در جهت محور X ها بوده است. لازم به ذکر است که در این مقاله محاسبات برای دو حالت متفاوت



شکل ۳. بازده خاموشی نانو مکعب های طلا- گرافن با تعداد لایه های متفاوتی از گرافن قرار گرفته (a) روی یک وجه مکعب و (b) روی دو وجه متقابل مکعب. طول ضلع تمامی مکعب ها ثابت و برابر 30 nm است.

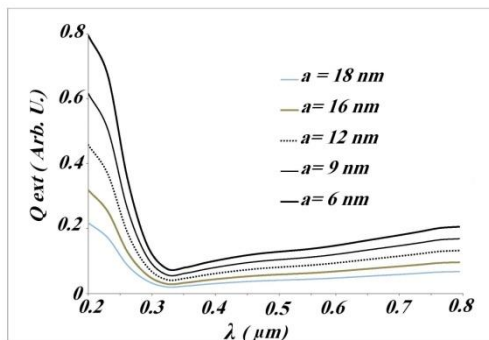
شکل (3-b) تغییرات طول موج قله سطح مقطع خاموشی نانو مکعب های طلای پوشانده شده با تعداد لایه های متفاوتی از گرافن بر روی دو وجه متقابل مکعب را نشان می دهد. در این حالت با افزایش تعداد لایه ها طول موج تشدید پلاسمونی به صورت تابع درجه دو افزایش می یابد. بعلاوه در مقایسه با نمودار (3-a) طول موج قله تشدید پلاسمونی همواره از مقادیر بیشتری برخوردار است. با پوشاندن دو وجه متقابل توسط گرافن عملاً مقدار ثابت دی الکتریک موثر در جهت میدان الکتریکی بیش از پیش (حالتی که تنها یک وجه توسط گرافن پوشانده شده باشد) افزایش می یابد، لذا می بایست انتظار جابجایی قرمز بیشتری را داشت. از طرف دیگر چنان که اشاره گردید با افزایش تعداد لایه های گرافن روی یک وجه، از ضخامت طلا کاسته می شود. این امر موجی می گردد که قسمت طلا عملاً از شکل مکعب به مکعب مستطیل تغییر نماید که این امر به نوبه خود نیز منجر به جابجایی قرمز بیشتری می گردد، لذا رفتار تابع از حالت خطی به درجه دو تبدیل می گردد. در شکل (4) نمودار بازده خاموشی بر حسب طول موج نور فرودی به ازای سه لایه گرافن بر روی یک وجه نانو مکعب، وقتی طول ضلع نانو مکعب ها از 6 تا 18 nm تغییر می کند، نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش طول ضلع نانو مکعب ها، ارتفاع و پهنای قله ها

راستای میدان الکتریکی افزایش یافته، لذا انتظار داریم که مد پلاسمونی شکل گرفته در این راستا به طول موج های بلندتر منتقل گردد. در حالی که مد پلاسمونی مربوط به جهت عمود بر میدان نباید تغییرات محسوسی انجام دهد، لذا در طول موج حدود 230 نانومتر ثابت باقی می ماند.



شکل ۴. بازده خاموشی نانو مکعب های طلا- گرافن با تعداد لایه های متفاوتی از گرافن قرار گرفته روی یک وجه مکعب. طول ضلع تمامی مکعب ها ثابت و برابر 30 nm است

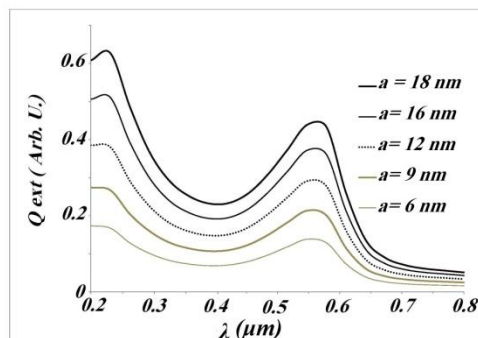
با افزایش تعداد لایه های گرافن به علت افزایش ثابت دی الکتریک موثر در جهت میدان الکتریکی انتظار داریم که قله مربوط به این مد جابجایی بیشتری به سمت طول موج های بلندتر نشان دهد که در عمل چنین رفتاری مشاهده می گردد. شکل (3-a) تغییرات طول موج قله طلای سطح مقطع خاموشی نانو مکعب هایی با طول ضلع 30 nm به ازای تعداد متفاوتی از لایه های گرافن را نشان می دهد. لازم به ذکر است که ابعاد نانو مکعب های مورد بررسی ثابت است و با تغییر تعداد لایه های گرافن روی یک وجه، در هر مرحله از ضخامت طلا کاسته شده و به ضخامت گرافن افزوده می شود. چنانکه مشاهده می گردد با افزایش تعداد لایه های گرافن طول موج قله های تشدید پلاسمونی با تقریب بسیار خوبی به صورت خطی افزایش می یابند.



شکل ۵. بازده خاموشی بر حسب طول موج به ازای سه لایه گرافن بر روی دو وجه متقابل نانومکعب. وقتی طول ضلع نانو مکعبها از ۶ تا ۱۸ nm تغییر می کند.

شکل (۶) نحوه تغییرات مربع میدان الکتریکی را در حالت میدان نزدیک برای نانو مکعب طلای خالص با طول ضلع ۳۰ نانومتر نشان می دهد. چنان که مشاهده می شود میدان الکتریکی در قسمت مرکزی نانو مکعب افت می کند ولی دارای مقداری متفاوت از صفر است. از آنجا که عمق پوسته برای طلا در محدوده مرئی در حدود ۲۵ نانومتر است، لذا با افزایش مقدار x ، میدان الکتریکی به کندی افت می کند، بنابراین به مقدار صفر نمی رسد. بعلاوه میدان الکتریکی در گوشه ها به میزان قابل توجهی افزایش نشان می دهد. علت این افزایش را می توان در دو قطبی های شکل گرفته بر اثر برهمکنش نور با نانومکعب طلا دانست. تشدید پلاسمونی این چند قطبی ها منجر به افزایش شدید میدان الکتریکی در نواحی گوشه ها گردیده است. شکل (۷) نحوه تغییرات مربع میدان الکتریکی بر حسب z به ازای $x = 15 \text{ nm}$ و $y = 15 \text{ nm}$ (وسط وجه نانو مکعب) در حالت میدان نزدیک برای نانو مکعب طلای خالص و نانو مکعب طلای پوشانده شده با ۲ و ۱۰ لایه گرافن بر روی دو وجه متقابل را نشان می دهد. چنان که مشاهده می گردد برای حالت نانو مکعب طلای پوشانده شده با ۲ لایه گرافن حضور گرافن منجر به تشدید بیشتر میدان بر روی وجهها گردیده است.

افزایش می یابد ولی با تقریب خوبی قله ها انتقالی ندارند بگونه ای که قله تشدید پلاسمونی طلا در طول موج ۵۴۷ nm ثابت می ماند.



شکل ۴. بازده خاموشی بر حسب طول موج به ازای سه لایه گرافن بر روی یک وجه نانومکعب وقتی طول ضلع نانو مکعبها از ۶ تا ۱۸ nm تغییر می کند.

در این حالت به دلیل ثابت باقی ماندن تعداد لایه های گرافن عملاً ثابت دی الکتریک موثر محیط در راستای میدان الکتریکی، تغییراتی نداشته، لذا انتظار داریم تا طول موج قله های پلاسمونی ثابت باقی بمانند.

شکل (۵) تغییرات بازده خاموشی بر حسب طول موج را برای حالتی که روی دو وجه متقابل نانومکعب های طلا، سه لایه گرافن قرار دارد، نشان می دهد. این نمودار به ازای مقادیر مختلف طول ضلع نانومکعب های طلا نشان شده است. همان طور که دیده می شود با افزایش طول ضلع نانومکعبها، نمودارها کاهش ارتفاع دارند. ضمن آن که در بازه طول موج ۸۰۰-۲۰۰ نانومتر قله تشدید پلاسمونی طلا مشاهده نمی شود. چنان که اشاره شد طول موج تشدید قله پلاسمونی تابعی از اندازه نانو ذره بوده و با تغییر اندازه دستخوش تغییرات قابل ملاحظه ای خواهد شد. با توجه به این که در این مقاله تنها ناحیه ۲۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر مورد بررسی قرار گرفته اند، لذا می توان نتیجه گرفت که در ناحیه مورد بررسی شرط تشدید محقق نگردیده است.

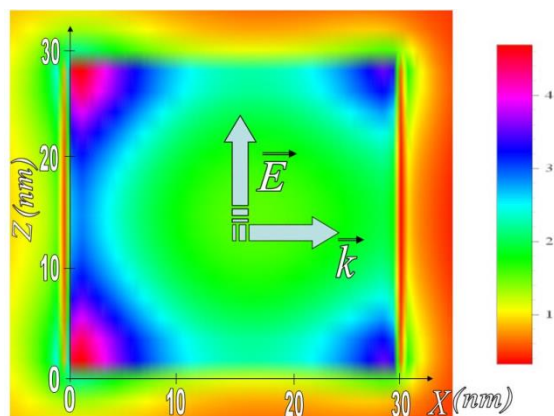
شکل ۷. تغییرات مربع میدان الکتریکی بر حسب (در وسط وجه نانو مکعب) در حالت میدان نزدیک برای نانو مکعب طلای خالص و نانو مکعب طلای پوشانده شده با ۲ و ۱۰ لایه گرافن بر روی دو وجه متقابل

نتیجه گیری

در این مقاله بازده خاموشی برای نانومکعب های طلا-گرافن با استفاده از تقریب دوقطبی مجزا محاسبه شد. مشاهده شد که در محدوده میدان دور، با افزایش تعداد لایه های گرافن از ارتفاع قله خاموشی کاسته شده و طول موج قله تشدید پلاسمونی شکل گرفته در راستای میدان الکتریکی انتقال به سرخ می یابد در حالی که طول موج قله مربوط به مد پلاسمونی شکل گرفته در راستای عمود بر میدان الکتریکی در ۲۳۱ نانومتر ثابت می ماند. تغییرات مربع میدان الکتریکی در حالت میدان نزدیک نشان می دهد که میدان الکتریکی در قسمت مرکزی نانو مکعب افت می کند ولی دارای مقداری متفاوت از صفر است. بعلاوه تشدید پلاسمونی دو قطبی های شکل گرفته بر اثر برهمکنش نور، منجر به افزایش شدید میدان الکتریکی در نواحی گوشه ها می گردد. تغییرات مربع میدان الکتریکی در راستای محور Zها برای نانو مکعب طلای پوشانده شده با چند لایه گرافن بر روی دو وجه متقابل نشان می دهد که حضور ۲ لایه گرافن منجر به تشدید بیشتر میدان بر روی وجهها می گردد. در حالی که افزایش بیشتر تعداد لایه ها منجر به کاهش تدریجی میدان بر روی وجهها می شود. بطور کلی نتایج نشان می دهد که حضور گرافن تاثیر بسزایی در پدیده تشدید پلاسمونی نانو مکعب های طلا داشته، بنابراین می تواند کاربردهای بالقوه ای در تهیه زیرلایه های پراکنندگی رامان بهبود یافته داشته باشد.

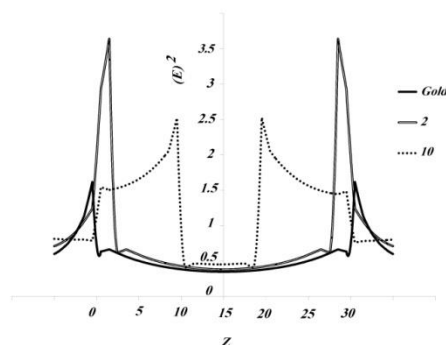
مراجع

1. Jain PK, Huang XH, El-Sayed IH, El-Sayed MA, *Noble metals on the nanoscale: Optical and photothermal properties and some applications in imaging, sensing, biology, and medicine*, Accounts Chem Res;41(12)(2008)1578-86.



شکل ۶. تغییرات مربع میدان الکتریکی در حالت میدان نزدیک برای نانو مکعب طلای خالص با طول ضلع ۳۰ نانومتر

در حالی که افزایش بیشتر تعداد لایه ها منجر به کاهش تدریجی می گردد. بعلاوه میدان الکتریکی موضعی در طول لایه گرافن به صورت غیر خطی افزایش می یابد. حضور لایه گرافن عملا دو تاثیر عمده بر سیستم می گذارد: ۱- افزایش ثابت دی الکتریک موثر محیط که منجر به بهتر شدن شرایط جهت ارضا شرط تشدید پلاسمونی می گردد، لذا سبب افزایش میدان الکتریکی موضعی می شود. ۲- کاهش میدان الکتریکی خارجی به سبب دارا بودن ثابت دی الکتریک بالاتر نسبت به هوا. از آنجا که این دو عامل در حال رقابت با یکدیگرند، بنابراین می توان انتظار داشت که یک ضخامت بهینه برای لایه گرافن وجود داشته باشد. با توجه به شکل (۷) این ضخامت برابر ۲ لایه است. بعلاوه این نمودار به وضوح نشان می دهد که حضور گرافن تاثیر بسزایی در پدیده تشدید پلاسمونی نانو مکعب های طلا داشته، بنابراین می تواند کاربردهای بالقوه ای در تهیه زیرلایه های پراکنندگی رامان بهبود یافته باشد.



14. Draine BT, Flatau PJ., *Discrete-dipole approximation for scattering calculations*, J Opt Soc Am A;11(4)(1994)1491-9.
15. Palik ED. Handbook of optical constants of solids, Academic Press, New York, (1985).
16. Matkovic A., Chhikara M, Milicevic M, et al., *Influence of a gold substrate on the optical properties of graphene*, J App. Phys;117(1)(2015)015305.
2. Daniel MC, Astruc D. *Gold nanoparticles: assembly, supramolecular chemistry, quantumsize- related properties, and applications toward biology, catalysis, and nanotechnology*, Chem Rev;104(1) (2004)293-46.
3. Campion A, Kambhampati P., *Surface-enhanced Raman scattering*, Chem Soc Rev;27(1998)241-50.
4. Miller MM, Lazarides AA., *Sensitivity of metal nanoparticle surface plasmon resonance to the dielectric environment*, J Phys Chem B;109(46)(2005)21556-65.
5. Prodan E, Radloff C, Halas NJ, Nordlander PA. *Hybridization model for the plasmon response of complex nanostructures*, Science;302(5644)(2003)419-22.
6. Fang Z, Liu Z, Wang Y, Ajayan PM, Nordlander P, Halas NJ. *Graphene-antenna sandwich Photodetector*, Nano Lett;12(7)(2012)3808-13.
7. Xu W, Ling X, Xiao J, Dresselhaus MS, Kong J, Xu H, et al. *Surface enhanced Raman spectroscopy on a flat graphene surface*, P Natl Acad Sci USA;109(24)(2012)9281-6.
8. Atanasov V, Saxena A., *Tuning the electronic properties of corrugated graphene: confinement, curvature, and band-gap opening*, Phys Rev B;81(20)(2010)205409/1-8.
9. Rechberger W, Hohenau A, Leitner A, Krenn JR, Lamprecht B, Aussenegg FR. *Optical properties of two interacting gold nanoparticles*, Opt Commun; 220 (1-3)(2003)137-41.
10. Karamehmedović M, Schuh R, Schmidt V, Wriedt T, Matyssek C, Hergert W. *Comparison of numerical methods in near-field computation for metallic nanoparticles*, Opt Express;19(9)(2011)8939-53.
11. Draine BT, Flatau PJ. *User guide to the discrete dipole approximation code DDSCAT 7.2*, (2012).
12. Draine BT., *In light scattering by nonspherical particles: theory, measurements, and geophysical applications*, Academic Press: New York., (2000)131-45
13. Flatau PJ, Draine BT., *Fast near field calculations in the discrete dipole approximation for regular rectilinear grids*, Opt Express; 20(2)(2012)1247-52.